

如何使宽带高IP2接收器保持最大动态范围

Michael Gurr, 产品线经理

Eamon Nash, 产品应用总监

摘要

本文探讨了驱动多倍频程RF采样ADC所涉及的挑战。文章讨论了与二阶和三阶交调相关的问题、单端驱动和差分驱动的利益权衡, 以及使得RF驱动放大器成为ADC驱动器的理想选择的特性和性能。

简介

ADI公司推出了AD9084和AD9088 RF采样ADC和DAC, 大大推动了多倍频程频段(例如2 GHz至18 GHz电子战(EW)频段)的直接采样和数字化发展进程。然而, 这也对宽带ADC和DAC的RF电路提出了挑战。传统的窄带接收器性能指标侧重于三阶交调失真(IP3), 但多倍频程接收器必须应对带内二次谐波、三次谐波和二阶交调产物。

为什么谐波会给宽带接收器带来问题

在宽带信号链中, 高性能系统的目标是以高保真度和最小噪声对大部分频谱进行数字化。当我们追求更优性能时, 比如更快的速度、更低的功耗、更高的灵敏度和精度, 难免要在某些方面做出妥协。例如, 为了抑制谐波和交调成分, 可能不得不牺牲一些系统性能和感知能力。虽然有些谐波和交调产物可以被滤除, 但随着工作带宽的扩大, 滤除带内谐波成分变得无法实现。

过去几十年, 为了解决在干扰信号存在的情况下出现的二次谐波和交调失真问题, 人们采用了能够缓解问题的解决方案——亚倍频程预选滤波器。干扰信号会对接收器构成威胁, 尤其是那些利用混频器和放大器等非线性器件将频谱下变频到较低采样速率转换器的接收器。此外, 谐波调制可能产生掩盖主要感知目标的带内信号音, 从而给区分虚假目标和防止欺骗攻击带来困难。

我们来看看将信号馈送给数字化仪的给定信号链的灵敏度: 理想情况下, 接收器传播单一独特的信号音, 让处理器基于干净的数据做出决策。但在现实中, 通常存在多个不同强度且会相互作用的信号音, 信号链的非线性会导致产生额外的信号音。通过在信号链中使用高线性度器件, 数字化仪可以保持较高的无杂散动态范围(SFDR)。SFDR用于衡量存在多个较大信号, 产生交调杂散(以相对于主信号的dB为单位)时, 接收器能够在多远的距离内检测到小信号, 有助于降低错误识别目标或成为欺骗攻击受害者的风险。

较新的架构将亚倍频程预选滤波器移到离天线更远的位置, 从而尽量降低噪声系数并提高动态范围。然而, 这也带来了挑战, 即在接收器的各个环节都会产生并放大谐波和交调成分。因此, 我们需使用新的方法来管理这些干扰信号音。

接收器架构的简要比较

RF采样架构在现代无线电接收器的设计中至关重要, 架构的选择对系统的谐波性能有很大影响。让我们简要比较一下两种常见RF采样架构的一些优缺点: 直接RF采样和外差转换器。

历史上, 外差架构(如图1所示)因多种原因而颇受欢迎。其中较主要的原因是, 当时有性能良好的RF器件和足够快速的数据转换器, 后者可支持中频采样并具备非常高的动态范围。外差架构能够提供合理的线性度和频率捷变性, 结合中频(IF)和射频(RF)的多级滤波后, 还具备实现优异谐波和杂散性能的潜力。外差架构的二次谐波和IP2性能通常表现一般。然而, 将RF信号与本振(L0)混频所引入的信号音可能会降低线性度。精心的设计和滤波可以缓解这些问题。此外, 得益于IF级提供的选择能力, 外差接收器具有良好的阻塞性能。

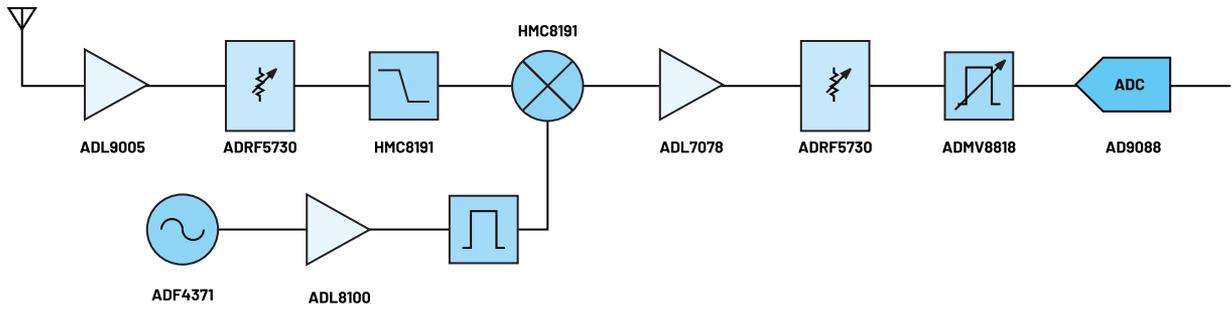


图1. 标准外差接收器架构

外差设计存在以下局限性：结构复杂；容易产生谐波；需要精心制定频率规划方案才能有效抑制谐波。此外，高性能外差接收器需要大量元器件，材料成本较高，在RF频率较高的情况下尤为如此。

较新的技术是直接RF采样接收器，如图2所示，搭配合适的器件时，它能够出色的谐波性能和非常高的线性度。直接RF采样通过直接对RF信号进行采样，省去了下变频级，实现了高性能的信号处理。得益于此，直接RF采样表现出非常好的二次谐波和IP2性能。与外差接收器类似，混频级可能会引入额外的谐波。必须注意的是，ADC的线性度和驱动ADC的电路对于确定IP2、IP3和交调性能指标有着重要影响。

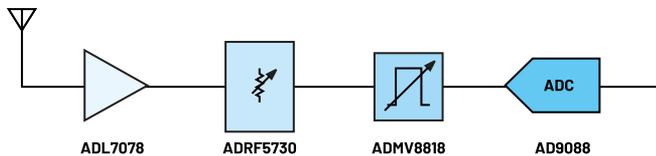


图2. 基本直接采样接收器架构

直接RF采样虽然在线性度和谐波性能方面具有优势，但也面临着一些挑战。采用直接采样架构的接收器可能容易受到带外和带内阻塞信号的干扰，这是因为接收器捕获的频率范围很广。有效的滤波和RF前端设计对于减轻这些阻塞信号的影响至关重要。此外，直接RF采样接收器可能面临与直流功耗和成本相关的挑战。高速转换器和FPGA处理需求可能会产生很高的功耗，因此需要谨慎管理功耗。

有关接收器架构的更详细比较信息，请参阅“[宽带RF接收器架构方案综述](#)”。

二阶和三阶谐波、IMD2及IMD3

外差和直接采样架构都有一些关键的性能权衡需要考虑。其中一个重要指标是信号音线性度，这通常是设计讨论的重点。二次和三次谐波以及交调失真(IMD)产物，是内部和外部产生的干扰信号的较常见来源。了解这些干扰信号音的起源和影响，以及知道如何减轻其影响，对于系统设计人员来说至关重要。

图3为两个相邻信号音作用于RF放大器时产生的频谱。常用的双信号音测试广泛用于测量出现在信号音附近的三阶交调产物（位于 $2F_1-F_2$ 和 $2F_2-F_1$ 处）。该测试模拟了一个接近主音频率的信号到达接收器的情况。使用基音功率与IMD3信号音功率之间的差值来计算输出三阶交调点(OIP3)，如公式1所示：

$$OIP3 = P_O - \frac{IMD3}{2} \quad (1)$$

其中， P_0 是基音输出功率。

OIP3是一个关键的RF系统规格，可用于预测邻道功率比(ACPR)，同时还能衡量系统承受通道内阻塞信号的能力。

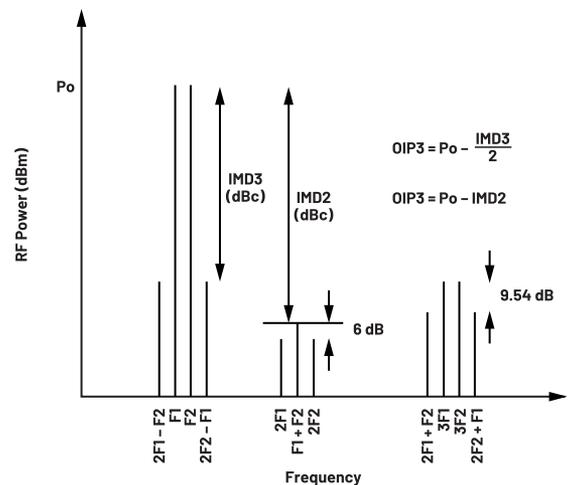


图3. 双音激励产生的二次谐波、三次谐波、IMD2和IMD3产物

深入分析图3，我们发现双音测试产生了其他副产物。这些副产物包括：原始信号音的二次和三次谐波，位于 $2F_1$ 、 $2F_2$ 、 $3F_1$ 和 $3F_2$ 处；IMD3信号音，位于 $2F_1+F_2$ 和 $2F_2+F_1$ 处；以及二阶交调信号音，位于 F_1+F_2 处。使用基音与 F_1+F_2 信号音之间的差值来计算二阶交调点(OIP2)，如公式2所示。

$$OIP2 = P_O - IMD2 \quad (2)$$

在传统的窄带外差接收器中，由于IF级会进行滤波，IP2及二次和三次谐波不太受关注。然而，直接采样接收器中的滤波功能较少，因此必须考虑这些产物的大小。例如，2 GHz至18 GHz EW接收器扫描时，接收器内产生的谐波产物有可能产生误警报或掩盖真正的威胁。

支持直接采样的ADC

AD9088和AD9084属于多通道RF采样ADC/DAC系列，其模拟输入带宽分别为16 GHz和18 GHz。图4显示了AD9088的部分框图，重点突出其RF采样ADC。AD9084采用差分输入结构，而AD9088集成了巴伦，并具有50 Ω的单端输入电阻。考虑用RF放大器驱动这些ADC时，以dB功率形式表示器件规格会很有用（如图4所示）。通过将dBFS（相对于满量程的分贝数）规格转换为dBm（相对于50 Ω的分贝数），满量程输入以及折合到输入端的IP2和IP3便可用dBm表示。例如，如果将两个5.2 GHz、-15 dBm的信号音作用于AD9084的输入端，产生-59.3 dBc的F1+F2 IMD2产物，则等效IP2为44.3 dBm。同样，二次和三次谐波可以用dBc（相对于载波的分贝数）表示，噪声可以用dBm/Hz表示。

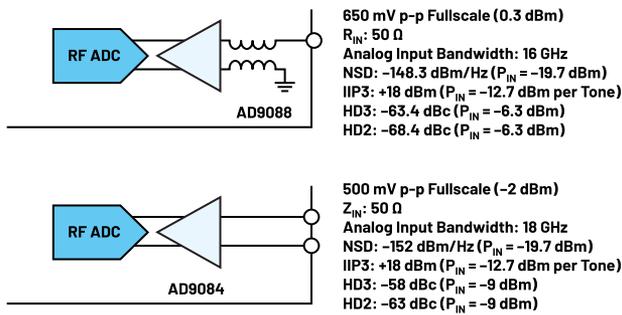


图4. AD9084和AD9088 ADC以及折合到输入端的RF规格

典型宽带RF放大器的谐波性能

优化接收器设计以实现高线性度，或者当接收器输入功率增加时，尽量降低谐波及其产物的影响，对于提高接收器的灵敏度非常重要。通过精心的频率规划和滤波可以有效减少内部产生的谐波和交调，但在有信号干扰和噪声严重的环境中，系统设计人员还必须考虑接收器的多信号音输入。每个信号链模块的固有谐波性能直接影响整个系统的性能。

在RF信号链的各种器件中，RF放大器通常是内部谐波产生的主要来源。宽带放大器是覆盖倍频程或十倍频程等宽频率范围的放大器，其IP2和IP3值可能在30 dBm左右，这些值会随频率而变化。如图3所示，三次谐波可能产生近载波杂散，不过这些杂散可以通过适当的RF和IF滤波来缓解。对于滤波应用而言，外差接收器中的二次谐波往往在带外，因此不太受关注。在宽带直接采样RF接收器中，这些二次谐波产物可能落在所需的频带内，并且难以滤波。为了解决这个问题，ADI公司开发了高IP2放大器。

图5为ADI公司新型宽带LNA ADL7078的框图和基本连接电路。该LNA的输入耐受能力高达32 dBm，进而望降低对限幅器的需求，此外还包含48 dBm（典型值）的高OIP2，如图6所示。该LNA由单个正电源供电，其偏置电流由连接在RBIAS引脚和VDD之间的电阻设置。RF输入与输出采用交流耦合，VDD偏置电感集成在芯片内。

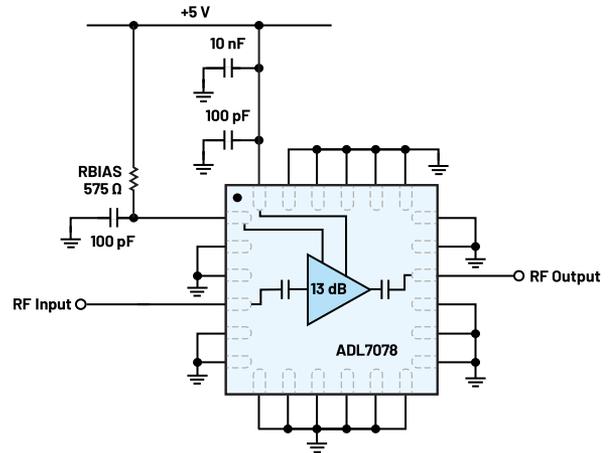


图5. ADL7078的功能框图

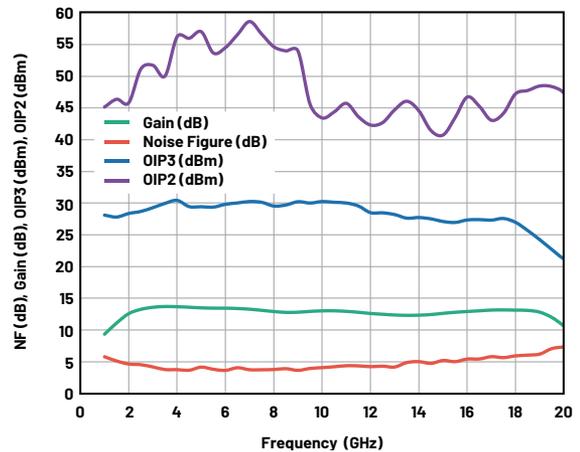


图6. ADL7078的增益、噪声系数、OIP2和OIP3

与ADI公司最近发布的几款RF放大器一样，ADL7078将通常需要外部提供的电路元件集成到封装和芯片中。这种集成能够有效缩小电路板空间，并简化设计过程。封装中包括隔直电容，分别位于RF输入端和输出端，并且集成了偏置电感，支持为芯片封装直接提供直流偏置电压。此外，得益于器件制造和设计方面的最新进展，该LNA不再需要负电源电压来偏置放大器的栅极。这不仅简化了电源设计，而且无需按顺序供应各个电压。如图5所示，ADL7078仅需要电源线滤波和一个外部电阻来设置静态漏极电流 I_{dq} 。

在典型的宽带多倍频程分布式放大器中，IP₂性能呈现V形曲线，如图7所示。在双倍频程带宽的中点以下，二次谐波保持在带内，导致IP₂性能随着频率的升高而保持不变或变差。一旦二次谐波移出带外，IP₂性能就会在放大器通带的高频段中得到改善。相比之下，ADL7078及其低频配套器件ADL8104在整个工作带宽内的IP₂性能表现相对平坦。此外，与典型的分布式放大器相比，这些放大器的IP₂性能通常更高，也因此成为了多倍频程、直接采样RF信号链中ADC驱动器的理想选择。

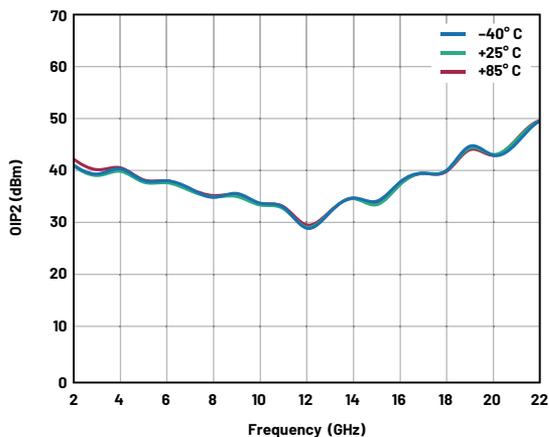


图7. ADL8100 IP₂，宽带、分布式、多倍频程放大器中的典型IP₂性能

将ADL7078用于直接采样接收器

为了将关于接收器架构比较的讨论与高线性放大器的重要性结合起来，我们开展了直接采样和外差接收器的仿真实验，以展示其性能差异。通过这些简单的信号链仿真，我们很容易能理解为什么使用高线性度放大器可以为无杂散动态范围带来巨大优势。

了解信号链IP₂性能的一种方法是检查每个器件及其对级联IP₂的贡献，从而识别潜在的瓶颈。这种折合到输入端的系统仿真以可视化方式呈现性能，有助于设计决策。但是，对于每条迹线，它仅提供单个频率的信息。

在图8中，我们可以看到第一个瓶颈是接收LNA，即信号链中的第一个有源器件。与典型的宽带LNA相比，使用高IP₂放大器时，输入IP₂ (IIP₂)性能高出大约20 dBm。对于任一信号链，混频器总会带来难题，它会产生谐波及其混频产物，对谐波性能不利。后续滤波级应改善谐波性能，减少到达ADC的杂散成分。

类似地，在图9所示的直接采样接收器中，LNA中唯一的瓶颈显著影响了到达ADC的杂散成分。仅仅改变这一个器件就会导致20 dBm的性能差异，谐波频率的能量降低为原来的近1/7。

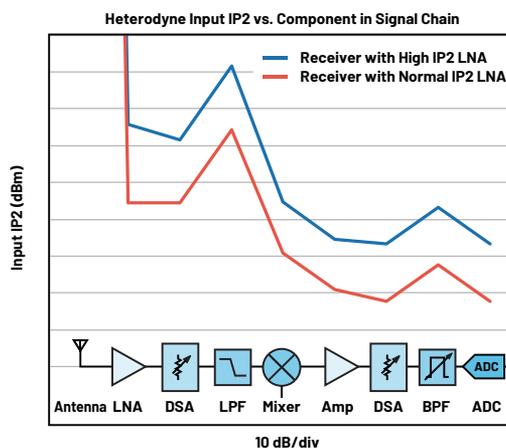


图8. 外差接收器级联输入IP₂

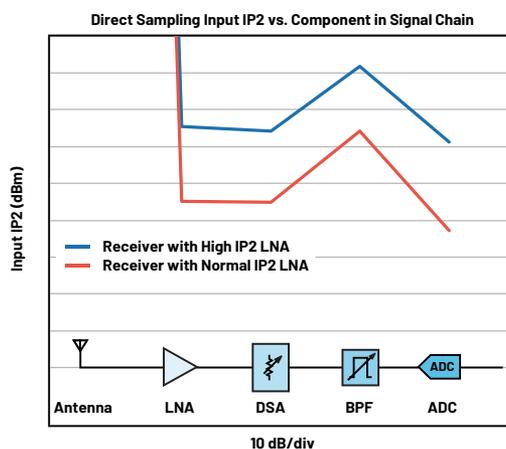


图9. 直接采样接收器级联输入IP₂

为进一步了解ADL7078和ADL8104等高线性度、高IP₂的放大器对系统性能的影响，我们可以分析以下案例：输入信号为8 GHz单频信号音，同时存在一个功率比主信号音低10 dBc的3 GHz阻塞信号音，研究到达ADC的杂散成分。我们仅关注图2所示的直接采样架构，因为外差接收器会引入额外混频产物，可能会使比较复杂化，很明显主信号音（归一化到0 dBm）会产生一些谐波成分，并且主信号音与阻塞信号音相互作用，产生交调产物。尽管谐波成分在到达ADC之前已经过滤波，但它仍然存在且幅度很大，而且交调产物会产生不需要的信号噪声。在图10中，测得的最强交调信号音(5 GHz)为-50 dBc。在图11中，观察到到达ADC的同一信号音为-23 dBc。这种巨大的能量差异会直接影响接收器灵敏度。因此，为实现最佳系统性能，选择一款能够有效降低谐波和交调成分的放大器至为关键。

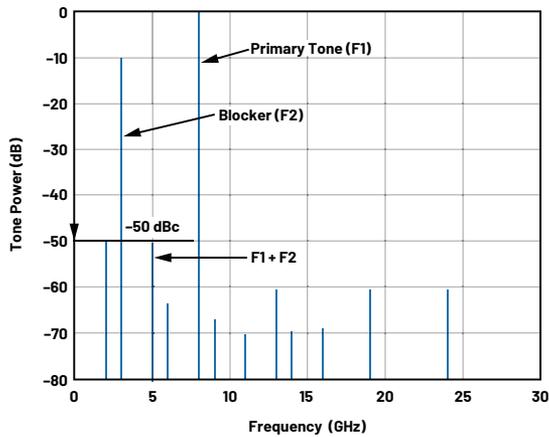


图10. ADC输入端的杂散成分，采用ADL7078高IP2 LNA和直接采样接收器；基音归一化到0 dBm。

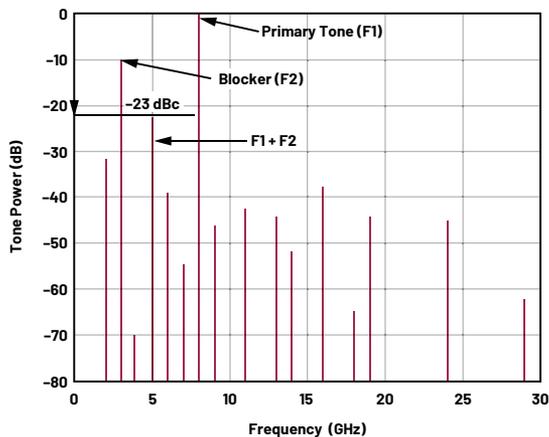


图11. ADC输入端的杂散成分，采用普通LNA和直接采样接收器；基音归一化到0 dBm。

结论

随着高速RF采样ADC的出现，市场迫切地需要更多IP2和IP3性能与传统外差接收器相媲美的宽带驱动电路。宽带采样带宽以及可能存在的带内阻塞和干扰信号，让LNA和ADC驱动器的二次谐波和交调性能变得更加重要。此外，三次谐波和交调性能仍然是评估宽带放大器的关键因素。ADI公司的高IP2放大器，即ADL7078和ADL8104，其IP2性能远超市场上现有的单通道放大器IC。这些放大器非常适合用作宽带系统中的ADC驱动器。它们集成了交流耦合电容和偏置电感，从而实现了紧凑的外部尺寸，并提高了能效。此外，通过ADC控制驱动放大器偏置电流的能力，进一步增强了这些器件的灵活性和易用性。

参考文献

Benjamin Annino。“多倍频程宽带数字接收器的SFDR考虑因素”。《模拟对话》，第55卷，2021年1月。

Brad Hall和David Mailloux。“数字可调谐滤波器如何实现宽带接收器应用”。《模拟对话》，第56卷，2022年6月。

Umesh Jayamohan。“祖父时代的ADC已成往事：RF采样ADC给系统设计带来诸多好处”。ADI公司，2015年7月。

作者简介

Michael Gurr是ADI公司航空航天和防务事业部的RF放大器产品线经理。他于2018年加入ADI公司，先后担任多个RF设计和管理职位。Michael在GaN和GaAs放大器开发领域拥有十多年的经验，曾在多个岗位任职。他于2013年获得波士顿大学电气工程学士学位，2016年获得东北大学电气工程硕士学位，2021年获得马萨诸塞大学安姆斯特分校工商管理硕士学位。

Eamon Nash是ADI公司应用工程总监。他在ADI公司担任过涉及混合信号、精密和RF产品的不同现场应用支持和工厂职位。他目前专注于面向卫星通信和雷达的RF放大器和波束成形器产品。他毕业于爱尔兰利默里克大学，获电子工程学士学位，拥有5项专利。

在线支持社区



访问ADI在线支持社区，中文技术论坛

与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答，或参与讨论。

请访问ez.analog.com/cn

